

# Ускорение ионов $c^{4+}$ в бустерном синхротроне УК ИТЭФ

Н.Н. Алексеев, П.Н. Алексеев, В.Н. Балануца, С.Л. Березницкий, А.Е. Большаков, М.А. Веселов, А.С. Журавлев, В.П. Заводов, С.А. Кондрашев, Н.Д. Мещеряков, А.Д. Мильяченко, В.И. Николаев, Э.И. Потрясова, В.Ф. Петрухин, Е.В. Пушкин, Е.А. Сысоев, Б.Ю. Шарков, В.А. Щеголев, М.В. Щелканов

ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

В ходе реализации в ИТЭФ проекта сооружения установки ИТЭФ-ТВН осуществлен физический запуск бустерного синхротрона УК, в котором получено ускорение четырехзарядных ионов углерода до энергии 300 МэВ/н. Ионный пучок из лазерного источника предварительно ускорился в инжекторе И-3 до энергии 1,2 МэВ/н. Полученная в УК энергия пучка позволяет получать полностью ободранные легкие и средние ионы для последующего их ускорения до предельной энергии 4,3 ГэВ/н и накопления в кольце У-10. Монтаж и наладку системы многократной перезарядной инжекции пучка из УК в У-10 планируется завершить в текущем году. Приводятся экспериментальные данные о достигнутых параметрах ускоренного пучка, обсуждается состояние дел по проекту ИТЭФ-ТВН.

## Введение

В результате реконструкции ускорительного комплекса ИТЭФ по проекту ИТЭФ-ТВН [1] предполагается создать на основе имеющихся в ИТЭФ ускорительных установок современную экспериментальную базу, которая позволит проводить комплексные исследования, направленные на развитие технологии сильноточных тяжелоионных пучков. При этом расширяются имеющиеся в настоящее время возможности по ускорению протонов до энергии 9,3 ГэВ и проведению физических экспериментов на внутренних мишенях и выведенных пучках.

Схема ускорительного комплекса показана на рис. 1. Комплекс предполагается использовать в режиме ускорителя протонов и ионов, а также накопителя ионов. Проектные характеристики комплекса перечислены в табл. 1.

Реконструкция уже ведется в продолжение двух лет и близка к завершению. Одним из основных этапов пуско-наладочных работ является физический запуск бустерного синхротрона УК в режиме ускорения не полностью ободранных ионов углерода.

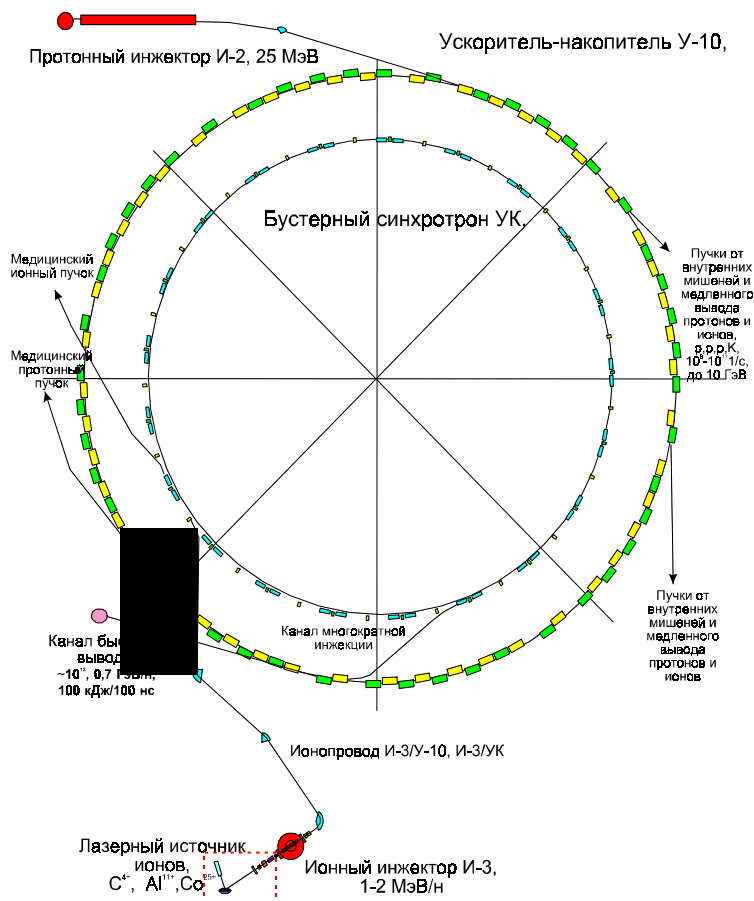


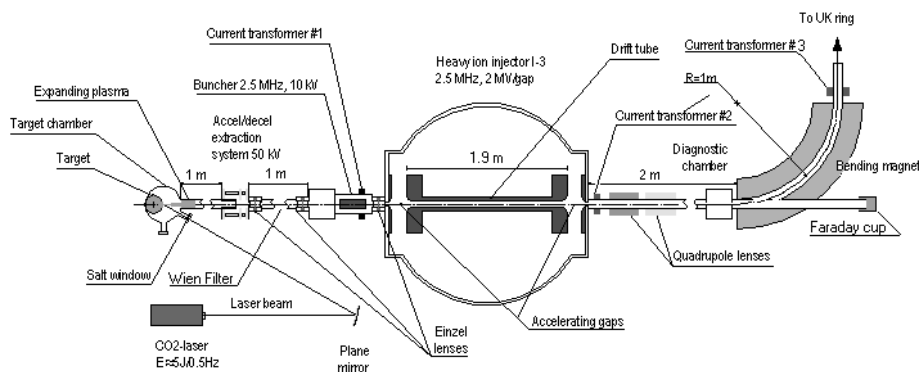
Рис. 1. Ускорительный комплекс ИТЭФ после реконструкции.

**Таблица.1.** Характеристики комплекса ИТЭФ после реконструкции.

<i>Ускоритель протонов</i>	
Выходная энергия	до 9,3 ГэВ
Интенсивность	$10^{11}$ p/c
Энергия инжекции (линяк И-2)	25 МэВ
Использование пучка*	Внутренние мишени (до 9,3 ГэВ) Медленный вывод (до 9,3 ГэВ) Быстрый вывод (до 3 ГэВ) Медицинский вывод (до 250 МэВ)
<i>Ускоритель ионов</i>	
Выходная энергия	до 4,3 ГэВ/н
Интенсивность	до $10^{11}$ н/с
Энергия предынжекции (резонатор И-3)	4 МВ
Энергия инжекции (бустер УК)	20-50 МэВ/н
Использование пучка	Аналогично (*)
<i>Накопитель ионов</i>	
Энергия частиц	300-700 МэВ/н
Энергия пучка	До 0,1 МДж
Мощность пучка	до 1 ТВт
Энергия предынжекции (резонатор И-3)	4 МВ
Энергия инжекции (бустер УК)	300-700 МэВ/н
Использование пучка	Быстрый вывод

### Параметры пучка ионов углерода на выходе лазерного источника

Для получения пучка ионов углерода использовался лазерный ионный источник (ЛИИ) на основе CO<sub>2</sub>-лазера с энергий 5 Дж. Схема размещения ЛИИ в канале инжектора И-3 показана на рис. 2. Форма импульса общего ток пучка из источника по измерениям в конце согласующего канала И-3, а также результаты анализа его компонентного состава показаны на рис. 3. Как видно из приведенных осциллограмм, амплитуда полного тока составляет 10–15 мА, полная длительность импульса пучка достигает 20 мкс. В пучке присутствуют ионы до пятой зарядности включительно. Однако пятизарядные ионы наблюдаются только в головной части пучка, длительность их импульса не превышает 2–3 мкс. Долговременная работа ЛИИ показала, что амплитуда тока пятизарядных ионов заметно уменьшается при снижении качества лазерного луча, облучающего мишень. Четырехзарядные ионы составляют от 30 до 50% пучка. Содержание в пучке трехзарядных ионов 20–30%, двухзарядных – 10–15%, однозарядных – не более 5%.



**Рис. 2.** Схема линейного инжектора И-3.

### Предварительное ускорение ионов C<sup>4+</sup> в линейном инжекторе И-3

Динамика пучка в согласующем канале и резонаторе И-3 рассмотрена в [2]. Пропускная способность согласующего канала И-3 по результатам моделирования ограничивается для ионов углерода общим ионным током порядка 40 мА. Аксептанс канала при нулевом токе пучка близок к 2000 п·мм·мрад. Предельный вы-

ходной ток пучка достигается при величине входного эмиттansa порядка 500 п.мм-мрад. Расчетная зависимость тока на выходе согласующего канала от величины входного тока показывает, что ток больше 50 мА невозможно пропустить через канал, при этом пучок с током до 35 мА проходит без потерь частиц.

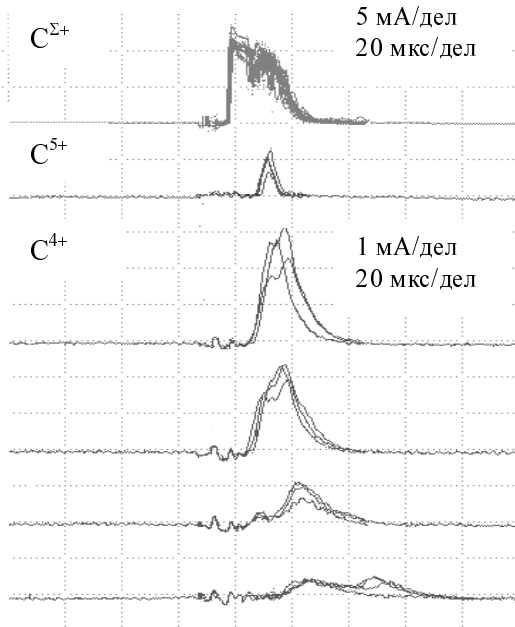


Рис. 3. Осциллограммы ионов углерода разных зарядностей на входе инжектора И-3.

Резонатор И-3 без группирователя ускоряет пучок ионов с  $Z/A = 0,2 \div 0,5$  в области фазы ВЧ, близкой к  $\pi$ , с разбросом частиц по энергии от нуля до максимума, близкого к удвоенной амплитуде ускоряющего напряжения. Область фазы ВЧ, ускоряющей частицы с разбросом по импульсам  $\pm 0,5\%$ , составляет около 20 градусов. Таким образом, захват частиц по продольному движению без группировки не превышает 6%. Группировка позволяет теоретически увеличить захват по продольному движению до 50–60%, однако реально наступает ограничение тока ускоренного пучка по поперечному движению частиц, вследствие значительного увеличения продольной плотности частиц и сил пространственного заряда.

Динамика фазовой плотности частиц в линейном канале И-3 при группировке и ускорении, показана на рис. 4. По результатам моделирования не удается получить без компенсации пространственного заряда на выходе И-3 более 5–7 мА ускоренного пучка при токе на входе в резонатор 10–15 мА. Реально полученная величина тока ускоренного пучка ионов  $C^{4+}$  (рис. 5.) составляет 1,5–2 мА с разбросом по импульсам порядка  $\pm 1\%$  при входном токе пучка порядка 5 мА.

### Наладка инъекции и ускорения пучка в кольцо УК

Ионопровод, связывающий инжектор И-3 с кольцом УК, напоминает американскую горку с подъемами, спусками и крутыми поворотами в наклоненных плоскостях. Длина ионопровода 45 м, траектория имеет три угла поворота в вертикальной плоскости и пять углов поворота в горизонтальной плоскости. Повороты пучка и фокусировка обеспечиваются импульсными поворотными магнитами и квадрупольными линзами. Для ди-

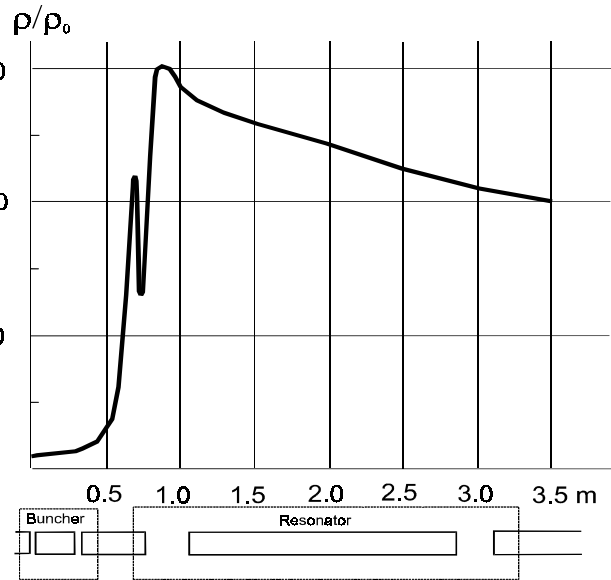


Рис. 4. Динамика фазовой плотности частиц в линейном канале инжектора И-3.

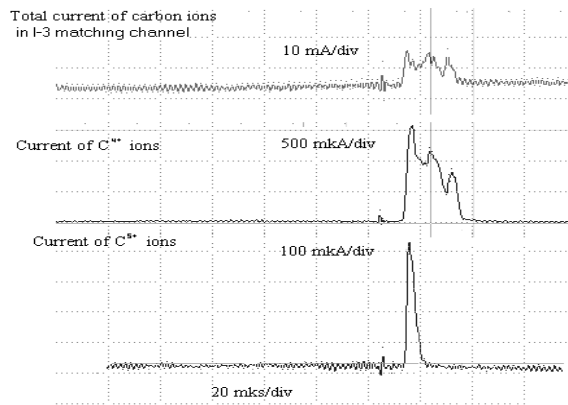


Рис. 5. Осциллограммы тока пучка ионов углерода на выходе инжектора И-3.

агностики пучка используется минимальный набор инструментальных средств, позволяющий измерять ток пучка в нескольких сечениях траектории. Средства измерения профилей пучка и эмиттанса, хотя и предусмотрены, но в настоящее время отсутствуют. Проводка пучка по ионопроводу затруднена отсутствием магнитных корректоров, позволяющих оперативно исправлять смещения траектории вызываемые неточностью юстировки и неидеальностью магнитных элементов. Оптимизация проводки пучка по ионопроводу до настоящего времени не закончена. Пока нам удается проводить по ионопроводу до 70% частиц. Максимальная полученная величина тока ионов  $C^{4+}$  на входе в УК составляет 1 мА.

Однооборотная инжекция пучка в кольцо УК осуществляется в горизонтальной плоскости при помощи электростатического инфлектора. Эффективность инжекции зависит от импульсного разброса частиц в пучке

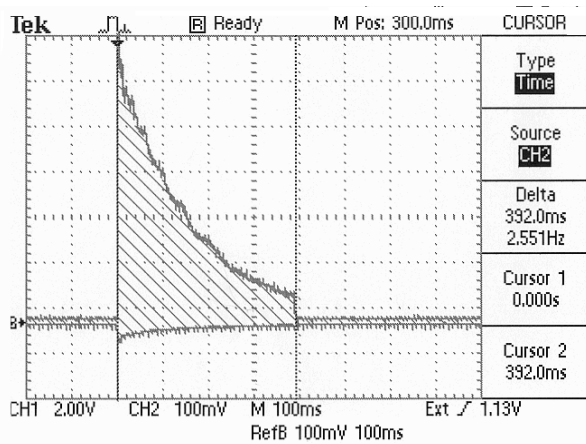


Рис. 6. Осциллограмма потерь ионов  $C^{4+}$ , циркулирующих в УК при вакууме в кольце  $10^{-9}$  Торр.

$\dot{B}$ , при которой удается скорректировать искажения магнитного поля на начальном этапе ускорения, связанные с вихревыми токами, составляет 1 Тл/с, хотя максимальное ускоряющее напряжение в УК (10 кВ на оборот) при равновесной фазе  $30^0$  допускает увеличение скорости роста индукции поля до 2,3 Тл/с. Для того чтобы сократить длительность цикла ускорения, скорость нарастания поля увеличивается по циклу и достигает по амплитуде 2,5 Тл/с.

В настоящее время мы используем две системы питания для кольцевого магнита УК. Одна система, так называемая слаботочная, собрана из четырех последовательно соединенных источников типа ИСТ-1000 с максимальным током до 1000 А, при котором максимальный импульс ускоренных частиц может достигать 1 ГэВ/с на заряд. Другая система собирается на основе высоковольтного тиристорного преобразователя системы питания кольца У-10 и позволяет получить предельное значение тока 3 кА и выше. Слаботочную систему предполагается использовать при работе УК в качестве бустерного синхротрона с последующим доускорением пучка в кольце У-10 до максимальной энергии 3–4 ГэВ/н. Питание УК от сильноточной системы предназначено для использования У-10 в качестве накопителя ионов. В этом режиме кольцевой магнит У-10 запитывается постоянным током до 600 А от источника типа ИСТ-1000.

Начальная наладка УК осуществлялась в режиме "малого цикла" с питанием кольца от слаботочной системы, позволяющей ускорять четырехзарядные ионы углерода до энергии 59 МэВ/н. Начальная энергия ионов  $C^{4+}$  составляла 1,03 МэВ/н, начальная скорость частиц – 0,047·с, конечная скорость – 0,34·с.

Ускоряющая система УК включает в себя две модифицированные ускоряющие станции типа "Селенит" [3], каждая из которых позволяет увеличивать частоту ускоряющего поля в 5 раз при амплитуде напряжения 10 кВ. При последовательном по времени включении станций с использованием процедуры перезахвата пучка с напряжения одной станции на другую может быть получен коэффициент перекрытия по частоте до 15 в диапазоне частот от 650 кГц до 10 МГц. Для получения максимальной энергии малого цикла не требовался весь частотный диапазон ускоряющей системы, однако, процедура перезахвата была необходима, так как частотный диапазон одной станции не достаточен для получения максимальной энергии.

Процедура перезахвата оказалась достаточно простой. На выбранной частоте (~2,3 МГц) обе станции были сфазированы, и на растущем поле производилось включение второй ускоряющей станции с последующим выключением первой. Длительность переходных процессов спада и подъема амплитуды ВЧ составляла 1–2 мс (несколько периодов синхротронной частоты). Полная длительность ускорения ионов  $C^{4+}$  на малом

и составляет в настоящее время 60–70%.

Для проверки состояния вакуума в кольце УК измерялась длительность циркуляции пучка при постоянном поле в кольцевом магните. Первоначально при величине среднего вакуума в кольце, измеренного по токам магнитоизрядных насосов, порядка  $5 \cdot 10^{-9}$  Торр, постоянная времени потерь ионов  $C^{4+}$  составляла 70–80 мс. В дальнейшем после прогрева вакуумной камеры и устранения нескольких микроутечек средний вакуум в кольце удалось повысить до уровня  $\sim 10^{-9}$  Торр и увеличить постоянную времени потерь до 250–300 мс (рис. 6).

При построении магнитного цикла в УК нам пришлось ограничивать скорость нарастания поля на момент инжекции пучка, исходя из допустимой величины искажений магнитного поля, связанных с вихревыми токами в вакуумной камере. Экспериментально подобранная на момент инжекции величина

цикле до энергии 59 МэВ/н составляла около 300 мс. В сентябре текущего года наладка УК была продолжена с большим циклом, в результате которой было получено ускорение ионов  $C^{4+}$  до энергии 300 МэВ/н (импульс 2,5 ГэВ/с на заряд). Потери частиц превышали 90%, интенсивность ускоренного пучка составляла  $\sim 10^8$  частиц (рис. 7).

### Резервы повышения интенсивности

Потери частиц от момента выхода из линейного инжектора И-3 до конца большого цикла ускорения УК в настоящее время составляют около двух порядков и распределяются следующим образом:

потери при транспортировке по ионопроводу	–	в 1,5 раза,
потери при инжекции из-за поперечного несогласования	–	в 1,5 раза,
потери при инжекции из-за большого разброса по импульсам	–	в 1,5 раза,
потери при захвате в режим ускорения на растущем поле	–	в 2 раза,
потери на резонансах	–	в 1,3 раза,
вакуумные потери	–	в 7,5 раз.

Все перечисленные позиции мы надеемся устранить либо существенно уменьшить в процессе последующей наладки комплекса и доведения его до эксплуатационного состояния.

### Общее состояние проекта ИТЭФ-ТВН

Сооружение накопительного комплекса ИТЭФ-ТВН предполагается завершить в текущем году. Для этого необходимо вывести ускоренный пучок не полностью ободранных ионов из УК, транспортировать пучок по переводному каналу УК/У-10 и ввести пучок при помощи перезарядной мишени в кольцо У-10. Все основное оборудование в настоящее время изготовлено. Установлена и испытана система быстрого вывода пучка из УК, смонтирован переводной ионопровод УК/У-10, завершаются монтажные работы системы многократной инжекции пучка в У-10.

Вывод пучка из УК в переводной канал был успешно опробован летом текущего года. До конца года мы планируем провести пробную перезарядную инжекцию пучка ускоренных в УК ионов  $C^{4+}$  в кольцо У-10 и таким образом завершить создание всех основных технологических узлов комплекса. В следующем году предстоит кропотливая работа по повышению интенсивности ускоренного пучка и оптимизации процесса накопления частиц в кольце У-10. Будет установлена также система вывода и транспортировки накопленного пучка.

### Заключение

В ИТЭФ осуществлен физический запуск бустерного синхротрона УК, в котором получено ускорение ионов  $C^{4+}$  до энергии 300 МэВ/н. Таким образом достигнуто существенное продвижение проекта модернизации ускорительного комплекса ИТЭФ и сооружения установки ИТЭФ ТВН.

### Литература

- [1] Кошкарев Д.Г. и др. "Модернизация ускорительного комплекса ИТЭФ – проект ИТЭФ-ТВН". Труды XV Сессии по ускорителям заряженных частиц. Протвино 1996. Т.2, с.3-19.
- [2] Alexeev N.N. et al. "Beam dynamics in matching channel of IТЕР-TWAC Heavy Ion Injector I-3". EPAC 2000.
- [3] Заводов В.П. и др. "Ускоряющая система ионного синхротрона-бустера УК ИТЭФ". Доклад на XVII Сессии по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 2000.

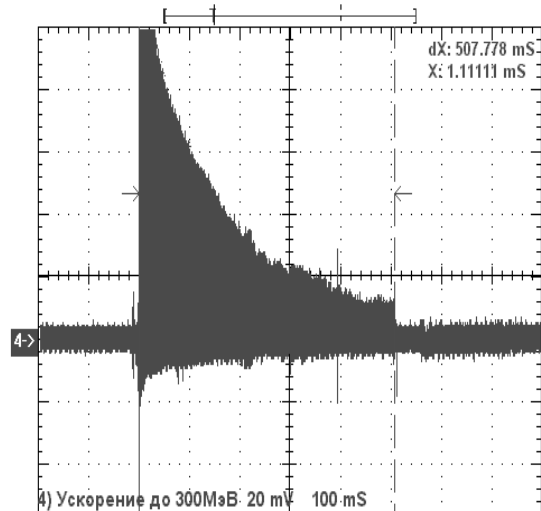


Рис. 7. Осциллограмма интенсивности пучка ионов  $C^{4+}$  при ускорении в УК до энергии 300 МэВ на нуклон ( $\sim 10^8$  част./дел.)